

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-17

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

ANÁLISE DE UMA FALHA OCORRIDA EM UM HIDROGERADOR CAUSADA POR TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

J.R.P. da SILVA*
Copel GeT
Brasil

A.J.N. FOGAÇA
Copel GeT
Brasil

Resumo *– O trabalho trata de uma análise de caso, referente a uma contingência ocorrida no enrolamento estatórico de uma das duas unidades geradoras de uma usina hidrelétrica, cada uma de 66,76 MVA, 13,8 kV. A data da ocorrência foi 22 de janeiro de 2013, quando uma falta fase/fase no enrolamento estatórico de uma das unidades causou danos às barras de topo das ranhuras 56 fase A e 57 fase B, bem como à barra de fundo da ranhura 58 fase B. Os maiores danos ocorreram nas cabeças de bobina superiores. Um aspecto importante do trabalho é a abordagem da influência de faltas no sistema elétrico adjacente à usina sobre os seus geradores. O trabalho é apresentado em seções, da seguinte forma: na seção 2 é feita uma descrição da ocorrência; na seção 3 são apresentadas as análises efetuadas; na seção 4 é descrito o trabalho de recuperação das barras danificadas; na seção 5 são descritas as várias hipóteses levantadas para explicar a ocorrência, bem como as críticas referentes a cada uma dessas hipóteses; na seção 6 são descritas as providências propostas para reduzir a probabilidade de recorrência da perturbação, os princípios que as suportam, o encaminhamento de cada uma e o estágio atual do atendimento à essas proposições; finalmente, na seção 7 são apresentadas as conclusões.*

Palavras chave: Hidrogerador – Falha – Transitório – Sistema de Transmissão

1 INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica Santa Clara (UHE SCL) possui duas unidades geradoras de 66,76 MVA, 13,8 kV. A usina faz parte de um complexo de duas usinas (junto com a UHE Fundão – FND), de propriedade da empresa Centrais Elétricas do Rio Jordão – ELEJOR. O complexo se interliga com o sistema elétrico brasileiro através de uma série de linhas de transmissão em 138 kV, conforme se pode ver na figura 1.

No dia 16 de janeiro de 2013, fortes chuvas com descargas atmosféricas atingiram a região, provocando o desligamento de 3 das 4 linhas que interligam o complexo ao sistema. Os desligamentos foram provocados por falhas fase-fase-terra e aconteceram várias tentativas de religamento, submetendo todos os geradores a elevados esforços mecânicos ao longo do processo. No dia 22 de janeiro, o gerador 2 da UHE Santa Clara foi desligado por um curto-circuito bifásico interno entre as fases A e B.

* Rua José Izidoro Biazetto, 158, CEP 81200-240 Curitiba–Paraná–Brasil. e-mail: jose@copel.com

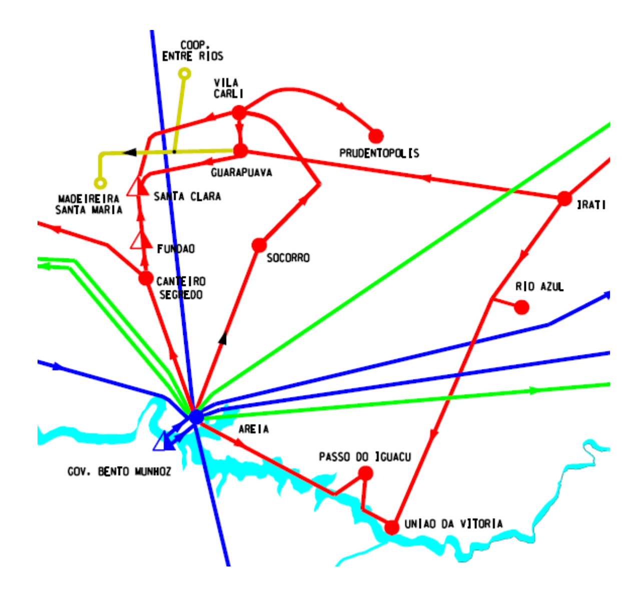


Fig. 1 – Sistema Elétrico de Interligação das Usinas Santa Clara e Fundão em 138 kV.

2 DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA

A falha ocorreu nas cabeças de bobina superiores das barras de topo das ranhuras 56 (fase A) e 57 (fase B). Como ocorre em curtos bifásicos, a intensidade da corrente que circula é extremamente elevada (a única limitação é a reatância interna do gerador). Isto provoca o derretimento de parte dos condutores de ambas as barras, com a projeção de cobre derretido sobre as bobinas contíguas à região do curto e a liberação de muita fuligem, decorrente da carbonização do isolamento (ver figuras 2, 3 e 4).



Fig. 2 – Região da Falha no Gerador 2 da UHE SCL.



Fig. 3 – Danos na Barra Estatórica 56 da UHE SCL.



Fig. 4 – Danos na Barra Estatórica 57 da UHE SCL.

3 ANÁLISE TÉCNICA DA OCORRÊNCIA

Analisando as oscilografias e a sequência de eventos da falha do gerador 2 de SCL, foi possível concluir que:

- A atuação da proteção foi correta e em tempo hábil. Houve a atuação do relé de falha à terra do estator (64G) e cerca de 3ms depois a atuação do diferencial (87U).

- No que se refere à extensão dos danos, o calor produzido pelo arco entre as barras de topo foi suficiente para danificar o isolamento da barra de fundo da ranhura 58 (também da fase B), que precisaría ser substituída.
- Houve muita produção de fuligem, que se espalhou pela máquina em função da circulação do ar de resfriamento.
- Em inspeção realizada em 14/02/2013 (após a remoção das barras de topo), foi constatado dano no isolamento das barras de fundo das ranhuras 56, 57 e 59, cuja substituição também foi recomendada.
- Os danos nas demais barras do enrolamento que não estiveram diretamente envolvidas no curto-circuito foram superficiais, não exigindo a sua substituição.
- Na inspeção visual realizada pela Engenharia, foram procurados outros pontos de rompimento de amarrações além daqueles no ponto do curto, o que poderia indicar que as cabeças de bobina não estariam suportando os esforços mecânicos decorrentes de curtos-circuitos (caracterizando assim um problema de projeto). Tais pontos não foram encontrados.
- No dia 16/01 houve duas ocorrências: na LT Vila Carli e na LT Canteiro Segredo (curto bifásico nas duas ocorrências, às 15:40 e às 15:46), com circulação de correntes elevadas nos geradores e com os correspondentes esforços mecânicos nas cabeças de bobina do gerador 2.
- O evento das 15:46, em particular, foi bastante severo sob o ponto de vista de esforços mecânicos, pois as correntes de curto da linha circularam no gerador por cerca de 450ms.

Levando-se em conta todos esses aspectos, pode-se inferir fortemente que a falha no gerador 2 ocorreu em decorrência de um eventual ponto fraco no isolamento (defeito de fabricação) de uma das duas barras de topo envolvidas no curto. Os esforços mecânicos dos curtos nas LTs no dia 16/01 provocaram uma trinca neste ponto fraco do isolamento e esta trinca acabou evoluindo para o curto do dia 22/01. Como agravante, ambas as barras são de tensão elevada (a da fase A tem 95% da tensão de fase e a da fase B tem 78% da tensão de fase, resultando em cerca de 12 kV entre as cabeças de bobina).
Convém ressaltar que o sistema elétrico adjacente à usina em questão tem um elevado nível de incidência de desligamentos, sendo a maioria por descarga atmosférica [1]. Vide Fig. 5 e Fig 6 a seguir.
A LT Vila Carli 138 kV, por exemplo, registrou 21 desligamentos no período 2007 a 2014. Esse fato corrobora a ideia de que os constantes esforços mecânicos no isolamento, associados à possível existência de pontos fracos no isolamento, implicou na falha em estudo.

COPEL
Geração e Transmissão

CENÁRIO ATUAL

Tabela 01: Histórico desligamentos – 6 anos

Linha	2008	2009	2010	2011	2012	2013
LI CANTEIRO DE SEGREDO - FUNDÃO-138kV	1	1		1		3
LT FUNDÃO - SANTA CLARA-138kV	1	1			1	
LT GUARAPUAVA - SANTA CLARA-138kV	11	4	2	2	4	7
LT SANTA CLARA -VILA CARLI-138kV	7	4	2	1	3	5
Desligamentos	20	10	4	4	8	15

Fonte: DEGT / DPMA (COPEL)

Índice de Desempenho das LTs GVA-SCL e VCA-SCL, as quais apresentaram maior numero de desligamentos nos últimos 6 anos (nº desligamentos / 100 km / ano):

- ✓ LT 138kV GVA – SCL: **7,85**
- ✓ LT 138kV SCL – VCA: **5,39**

Tabela 02: Histórico desligamentos Copel

Tensão (kV)	Nº desligamentos / 100 km / ano
69	12 a 15
138	**4 a 5**
230	≤ 2 (Aneel)
500	≤ 1 (Aneel)

Fonte: COPEL

Fig. 5 – Cenário Atual de Desligamentos de LTs na Região.



CENÁRIO ATUAL

Índice	Data / Hora	Duração	Natureza Elétrica	Estruturas GVA-SCL	Estruturas VCA-SCL	Trecho
D1	31/07/12 02:53	2 min	Fase - Terra	154 - 155	168 - 169	3
D2	25/10/12 09:04	2 min	Fase - Terra	135 - 136	-	3
D3	26/10/12 14:38	2 min	Fase - Terra	-	71-72	1
D4	06/12/12 13:26	2 min	Trifásica	109 - 110	123 - 124	2
D5	12/12/12 15:29	1 min	Fase - Terra	28 - 29 - 30	-	1
D6	16/01/13 15:41	6 min (GVA) / 5 min (VCA)	Bifásica - Terra	100 - 101	114 - 115	2
D7	06/02/13 21:54	1 min	Fase - Terra	106 - 107 - 108	120 - 121 - 122	2
D8	05/03/13 13:03	1 min	Fase - Terra	82 - 83 - 84	-	1
D9	15/05/13 04:56	1 min	Fase - Terra	111 - 112	125 - 126	2
D10	01/06/13 21:29	FM	Fase - Terra	-	172 - 173 - 174	3
D11	17/06/13 06:50	1 min	Fase - Terra	75 - 76	-	1
D12	21/07/13 15:53	FM	Fase - Terra	-	40 - 41	1
D13	22/09/13 06:02	2 min	Fase - Terra	-	85 - 86	1

Fonte: DEGT / DPMA (COPEL)

Índice de Desempenho das LTs GVA-SCL e VCA-SCL no período entre 31/07/2012 e 21/07/2013 (nº desligamentos / 100 km / ano):

- ✓ LT 138kV GVA – SCL: **14,52**
- ✓ LT 138kV SCL – VCA: **12,08**

Fig. 6 – Estratificação dos Desligamentos no Período 2012/2013.

Ressalta-se que a região do municipio de Guarapuava, que essas LTs percorrem, possui uma elevada densidade de descargas atmosféricas. Segundo o INPE, o índice médio é de 8,46 descargas/km^2/ano.
Foram também investigadas outras causas para os desligamentos, como por exemplo: característica do projeto eletromecânico das LTs, falhas na construção das LTs, alta resistência de aterramento (pé de torre) das LTs e presença de aves conhecidas no Paraná como curicacas. Nenhum desses itens analisados apresentou um resultado que justificasse os vários desligamentos.

4 OS TRABALHOS DE RECUPERAÇÃO

Para executar os trabalhos de recuperação do gerador não foi necessário contratar o fabricante, pois a Elejor possuia barras estatóricas de reserva e a maioria dos materiais necessários (conexões, capas isolantes, amarrações) para substituição do que foi danificado na ocorrência. Por isso o trabalho pode ser executado por uma empresa especializada nesse tipo de trabalho.

A extensão dos danos foi um pouco subestimada na inspeção inicial. Com a retirada das 2 barras diretamente envolvidas no curto-circuito e a limpeza da área afetada, constatou-se a necessidade de substituir um total de 12 barras estatóricas (6 de topo e 6 de fundo de ranhura). A figura 7 mostra a região do curto com o conserto finalizado.



Fig. 7 – Região Afetada após a Recuperação.

5 HIPÓTESES SOBRE A CAUSA DA OCORRÊNCIA

A hipótese inicialmente levantada sobre a causa da falha foi a de espaçamento insuficiente entre as cabeças de bobina. Isto configuraria um problema de projeto e/ou fabricação que, caso estivesse disseminado em todo o enrolamento estatórico, talvez exigisse a sua completa substituição. Entretanto, uma inspeção visual detalhada descartou esta hipótese. As distâncias entre as cabeças de bobina, ainda que não absolutamente regulares, estavam dentro das variações esperadas para um enrolamento estatórico adequadamente projetado, fabricado e montado.

Tratando de uma outra hipótese, em conversa com a equipe de operação e manutenção residente da usina, um outro aspecto foi levantado: durante a ocorrência de chuvas com descargas atmosféricas, era frequente ouvir-

se ruídos fortes nos geradores da usina, como se eles estivessem sendo submetidos a fortes variações de carga ou transitórios de algum tipo. Estas ocorrências geralmente coincidiam com o desligamento de uma ou mais linhas de transmissão de interligação do complexo. Investigando-se o histórico destes desligamentos, constatou-se que desde 2007 ocorreram 21 desligamentos das LTs do complexo, a grande maioria decorrente de descargas atmosféricas. Considerando a elevada frequência destes desligamentos, levantou-se a hipótese de que as estruturas dos enrolamentos estatóricos não estariam suportando os esforços mecânicos decorrentes destes transitórios. Novamente, a inspeção detalhada nos geradores mostrou que não havia sinais de afrouxamento nas fixações ou de movimentação nas cabeças de bobina.

Dessa forma, a única conclusão possível é a existência de algum ponto mecanicamente fraco no isolamento de uma das barras envolvidas no curto-circuito. Tal ponto fraco foi sendo periodicamente solicitado pelos transitórios causados pelos desligamentos das LTs e evoluiu para uma trinca, a qual finalmente levou ao curto-circuito.

Estudos adicionais foram feitos modelando-se o sistema em torno das usinas do complexo e calculando-se as correntes de falha para a ocorrência do dia 16/01. Foi possível verificar que, para as ocorrências do dia 16/01, as correntes de curto-circuito que circularam, apesar de ainda dentro da suportabilidade esperada para os geradores, submetem os mesmos a esforços mecânicos bastante elevados. De uma forma geral,o estudo permitiu concluir que o ponto de conexão ao sistema do complexo energético de Santa Clara e Fundão favorece a contribuição de potência das usinas em curto-circuitos que ocorrem no sistema de distribuição em uma extensa malha, incluindo eventos em média tensão (34,5 kV). Devido à grande frequência de descargas atmosféricas característica da região onde se encontram as usinas, este tipo de ocorrência com certeza contribuiu para a falha no gerador 2 da UHE SCL.

6 PROPOSTAS PARA MINIMIZAR O PROBLEMA

Várias propostas foram apresentadas para minimizar os impactos dos transitórios das LTs sobre os geradores das usinas do complexo. Abaixo citamos as principais:
- Utilização de proteções rápidas nas LTs do complexo que ainda não as possuam, de forma a reduzir o tempo de atuação dos atuais 400ms para cerca de 100 ms.
- Colocação de reatores limitadores de correntes de curto-circuito nas saídas das unidades geradoras, para reduzir as correntes de curto e os esforços eletromecânicos sobre os enrolamentos dos geradores.
- Instalação de para-raios, que atuam frente a descargas atmosféricas diretas e indiretas (nos pontos de instalação) evitando o desligamento da LT.
- Instalação de Poço Redutor, que reduz a resistividade do solo favorecendo a dissipação das descargas atmosféricas (indiretas), evitando assim o desligamento da LT.
- Eliminação de descarregadores nas saídas de linhas das subestações elevadoras das usinas.

Devido às características das usinas e do sistema de conexão, a Engenharia de Manutenção da Geração entendeu que a solução mais efetiva para minimizar os esforços mecânicos sobre as unidades geradoras seria a instalação de reatores limitadores [2].
Após o cálculo do reator limitador, foram efetuados estudos para verificar a efetividade desta solução, considerando varios aspectos.
No que se refere à redução da contribuição de corrente de curto dos geradores para a falta, os resultados estão resumidos na Tabela I [3] a seguir:

TABELA I. CORRENTES DE FALTA CALCULADAS

Curto trifásico-terra (A)		
Sem reator	7191	Redução de 42%
Com reator	4211	
Curto monofásico-terra (A)		
Sem reator	2644	Redução de 39%
Com reator	1587	

Como os esforços mecânicos são proporcionais ao quadrado da corrente, pode-se concluir que a instalação de reatores limitadores de corrente reduzirá pela metade os esforços sobre os enrolamentos estatóricos.
Os estudos incluíram os demais aspectos operacionais das usinas conectadas ao sistema com o uso dos reatores (regulação de tensão, balanço de reativos, etc) e os resultados não indicaram nenhum comprometimento significativo na operação das unidades geradoras.

7 CONCLUSÕES

A ocorrência com o gerador 2 da UHE SCL evidenciou a influência do sistema elétrico adjacente às usinas SCL e FND no que se refere aos esforços mecânicos nos geradores, decorrentes de faltas nesse sistema.

Essa constatação reforça a necessidade de uma exaustiva e detalhada análise técnica do desempenho dos geradores frente ao sistema elétrico onde serão conectados, em tempo de projeto, de forma a minimizar os eventuais futuros problemas verificados.

Quanto às soluções propostas, no caso específico da UHE SCL, a instalação de reatores limitadores de corrente se mostrou uma solução viável, cuja adoção ainda está sendo estudada pela Elejor.

8 REFERÊNCIAS

[1] M. Tonetti, M. A. de Souza, *Alternativas para Melhoria do Desempenho das LTs 138kV Guarapuava – Santa Clara (GVA-SCL) 138kV Vila Carli – Santa Clara (VCA-SCL)*". Curitiba. COPEL Geração e Transmissão S.A., Agosto, 2014.
[2] A. J. N. Fogaça, J. R. P. da Silva, *Relatório Técnico de Manutenção.* Curitiba. COPEL Geração e Transmissão S.A., Março, 2014.
[3] C. Eduardo M. Fernandes, *Análise do Impacto da Inserção de Reatores Limitadores de Curto Circuito nas Máquinas da UHE Fundão*. Curitiba. Departamento de Operação e Proteção da Distribuição da COPEL Distribuição S.A., Agosto, 2014.